

[1]

8 倍速 CRT によるホールド発光型ディスプレイの 動画質に関する検討

石黒秀一* 栗田泰市郎*

*電気通信大学大学院情報システム学研究科

〒182 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

*NHK 放送技術研究所

〒157 東京都世田谷区砧 1-10-11

あらまし 通常の 8 倍のフィールド周波数で動作する 8 倍速走査 CRT ディスプレイを用いた主観評価実験により、ホールド型の時間-発光特性を持つディスプレイの動画像表示における画質を検討した。加えて、より応答の遅い指数型表示の動画質についても検討した。これらの表示方式では画像の動き速度とともに画質が劣化することが定量的に明らかになった。改善案として、シャッタを用いる方式、2 倍速表示方式を検討した。結果として、シャッタ方式において開口率を 50% 以下にすれば一定の画質改善効果が得られた。また、2 倍速表示方式においても、シャッタ方式における開口率 50% と同等の画質改善効果が得られた。

キーワード ディスプレイ 動画像画質 ホールド型表示 時間-発光特性 シャッタ
2 倍速表示

Consideration on Motion Picture Quality of the Hold Type Display with an octuple-rate CRT

Hidekazu Ishiguro* and Taiichiro Kurita*

*The Graduate School of Information Systems

The University of Electro-Communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182

*NHK Science and Technical Research Laboratories

1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157

Abstract Picture quality of displays with hold type temporal-luminous characteristics is investigated, by subjective tests using an octuple-rate CRT display with an octuple field rate of television. Picture quality of displays with exponential characteristics is also investigated. Picture quality of these displays is deteriorated along with motion velocity of pictures. A method using a display shutter and double-rate displaying method are considered for improvements of the deterioration. As results, significant improvements are obtained by the shutter with apertures less than 50%. Similar improvements with 50% shutter are also obtained by the double-rate method.

key words display, motion picture quality, hold type display, temporal luminous characteristic, shutter, double-rate display

1. まえがき

CRTディスプレイでは、発光の時間的変化は瞬間的に高輝度となり、ある画素について見れば1フィールドに1回だけ発光するインパルス型である(図1a)。それに対し多くの液晶ディスプレイ(LCD)では、ディスプレイがメモリー機能を有し、ディスプレイ面のある画素が発光すると、次のフィールドの新しい画像情報で画素のメモリーが書き改められるまで比較的一定な輝度で発光し続ける。これはホールド型の発光と呼ばれている(図1b)。ホールド型のような発光時間の長い表示方法は、画像の輪郭部のぼけ妨害やJerkiness妨害(画像の動きがぎくしゃくして不自然に見える妨害、ジャダーとも言う)を起す原因となる。しかし、ホールド型の発光表示方法が動画像の画質に与える影響やその改善方法は、まだ十分には解明されていない。

宮原^[1]および下平ら^{[2][3][4]}は、ホールド発光型表示装置における動画像画質について検討を行った。しかしいづれにおいても、実験装置の制限のためか評価対象は白黒2値の単純な方形画像となっており、一般画像に対する画質については明らかにされていない。また、現在主流であるTFT型などの実際のLCDでは、デバイスの応答速度が遅いために発光が連続的に緩やかに変化している^{[5][6]}。従って、現状のLCDでは時間-発光強度特性が理想的なホールド型になっていないが、そのような発光特性における動画像の画質に関しては検討されていない。また、このような表示方法により生じる画質劣化の改善方法についても十分に検討されていない。

本報告では、8倍速CRTを用いたシミュレーションにより、ホールド発光型画像表示において一般画像を対象に行った主観評価実験結果

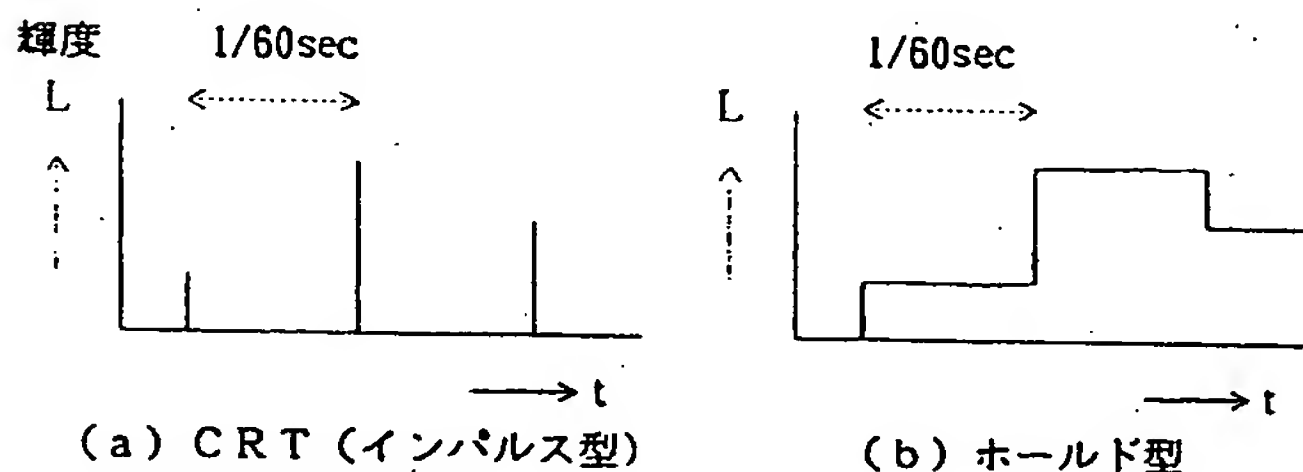


図1 ある画素における時間-発光強度

について述べ、表示方式の画質への影響を明らかにする。さらに、その画質の改善法について基本的な検討を行う。

2. 8倍速走査CRTディスプレイによる動画像シミュレーション

2.1. シミュレーション方法

一般画像を対象としてホールド型ディスプレイの動画像シミュレーションを行うために、8倍速走査CRTディスプレイを用いた。通常のテレビのフィールド周波数の8倍のフィールド周波数(480Hz)で画像を表示し、8倍速の各フィールド(1/480秒)を8回繰り返して表示することにより、ホールド型ディスプレイの1フィールド(1/60秒)の発光を近似できる(図2)。

時間-発光特性が理想的なホールド型になっていない場合については、各フィールドの画像レベルを1/480秒毎にしたいに増加させれば、応答速度の遅い特性をシミュレートすることもできる。さらに、1/480秒毎に適当に画像レベルを変化させれば後に述べる種々の画質改善法をシミュレートすることも可能である。このように以下では、種々のディスプレイの動画像表示における画質(以下、動画像)を、8倍速CRTディスプレイによるシミュレーションを通して検討する。

生理的データによると、視覚系において網膜の出力細胞である神経節細胞が出力できるパルス数は、1秒間に300個程度以下である^[7]。このため、人間は1/300秒以下の発光の違いを知覚できないと推測され、上記のような8倍速CRTにより様々な時間-発光特性のシミュレーションが可能と考えられる。

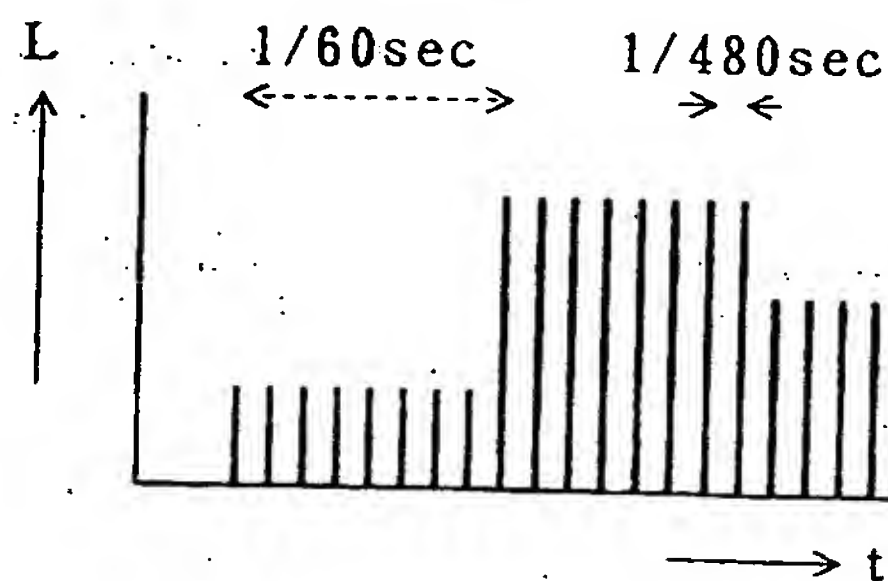


図2 8倍速CRTによるシミュレーション

2.2. シミュレーションのシステムと装置

図3にシミュレーションシステムの系統図を示す。信号源である画像シミュレータでは、ま

ず、静止画像を元にフィールド周波数60Hzの等速移動画像を作成し、その画素データを逆ガンマ補正により画像の輝度に対してリニアな値の画像データに変換する。得られた画像に対して時間方向の内挿を行い、1フィールド内(1/60秒)において様々な時間-発光強度特性を持つフィールド周波数480Hzの画像を作成する。その画像データに対してガンマ補正を行い、再びCRT表示に適合した画像データに変換し、8倍速走査CRTディスプレイに表示し、評価を行う。図3のテストパターンについては次節で述べる。

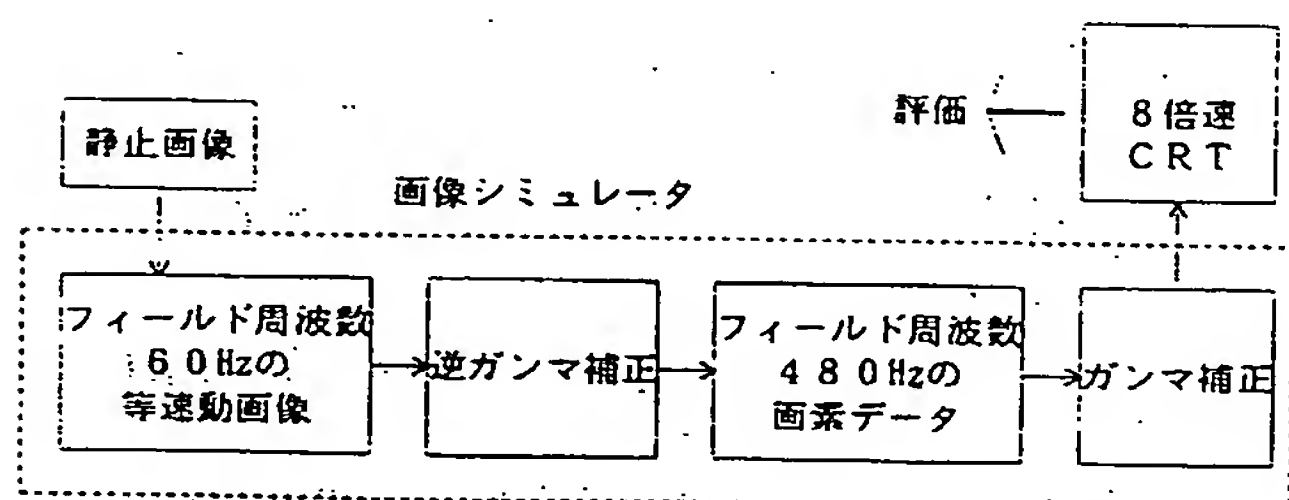


図3 シミュレーション系統図

2.3. 8倍速走査CRTディスプレイの時間-発光特性

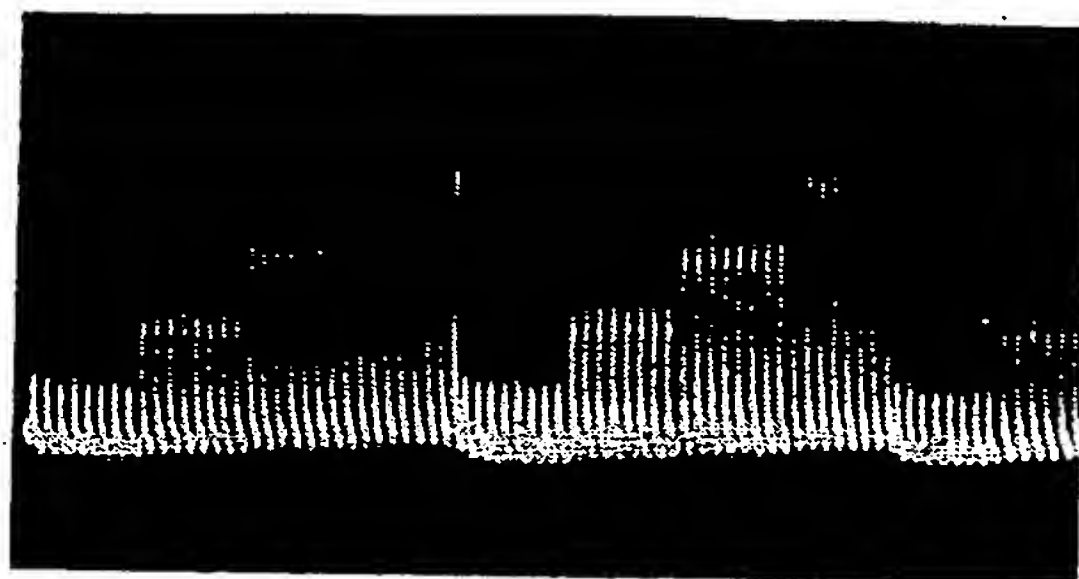
まず、テストパターンにより8倍速走査CRTディスプレイの時間-発光強度特性を測定した。テストパターンは、画像データとして全画面が一様なレベルで、輝度にリニアな信号レベル(信号の量子化レベルは0~255)において1/60秒毎に50、100、150、200である4フィールドのテスト画像を作成した。それらを図3に示したように画像シミュレータにおいて様々なタイプの時間-発光強度特性を持つ480Hz方式の画像に変換し、ガンマ特性を持たせ、それを8倍速走査CRTディスプレイで表示した。8倍速CRTは20"のCRTであるが、8倍速とするための制限により、画面中心部の1部分のみを発光させている。また、走査は順次走査を用いている。

以下のような時間-発光特性について測定を行った。

(1) ホールド発光型(8回繰り返し)

画像のレベルが1/60秒毎に変化した場合の8回繰り返し表示の発光応答を図4に示す。CRTは発光がインパルス型であるため、1/480秒周期のくし型の発光となっている。しかし、前記のように1/300秒以内の発光波形の違いは人間には知覚できないと考えられ、図4の発光により

ホールド型ディスプレイのシミュレーションが可能と考えられる。



水平軸: 20 msec/div 垂直軸: 輝度に対応
図4 8回繰返し(テスト画像)

(2) 傾きが指数曲線状に変化

現在のLCDデバイスでは時間-発光特性が指数曲線に近い変化となっている^{[5][6]}。そこで、発光が指数的に変化する場合のシミュレーションもあわせて行った。60Hz方式の1フィールド内の画素の発光の変化が、次式のような曲線となる場合について測定した。

まず、時間軸を離散化し、

$$t = mT_0 + n\Delta t \quad (m=0, 1, \dots, n=0 \sim 7) \quad (1)$$

とする。ここで

$$T_0 = 1/60(\text{sec}), \text{フィールド周波数 } f_v = 1/T_0(\text{Hz})$$

$$\Delta t = 1/480(\text{sec})$$

τ は時定数である。次に、指数型表示の発光 $y(t)$ を

$$y(t) = y_0(m)$$

$$+ ((1 - \exp(-n\Delta t/\tau)) / (1 - \exp(-T_0/\tau))) y_1(m)$$

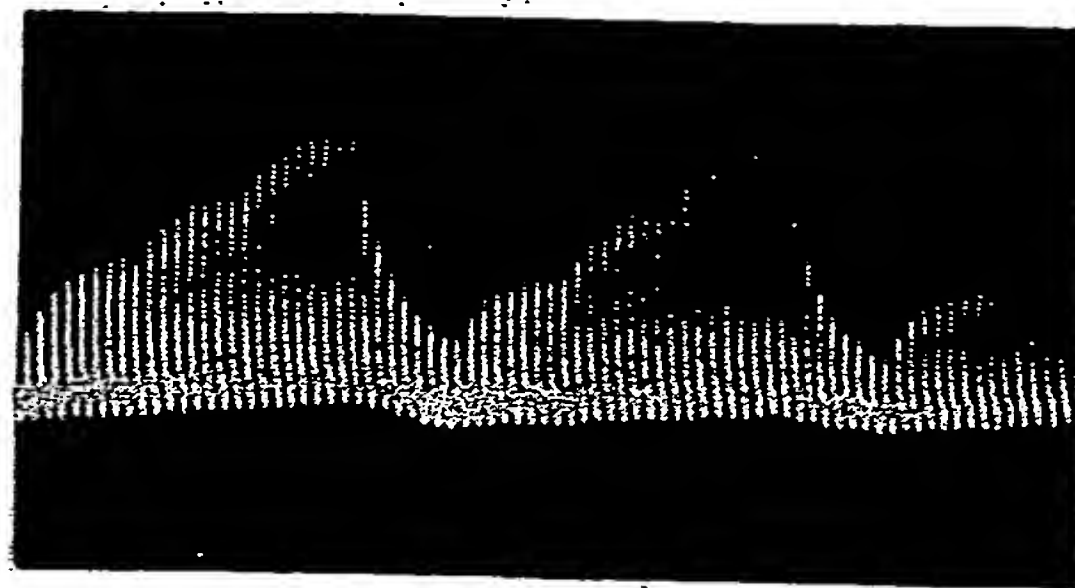
とする。ここで

$$y_1(m) = y_0(m+1) - y_0(m) \quad (2)$$

$$y_0(m) = y(mT_0) \quad (3)$$

である。 $y(mT_0)$ は1/60秒毎にディスプレイに入力される画像データである。

時定数 $\tau = 5(\text{msec})$ のときの発光応答を図5に示す。実際のLCDでは τ は画像レベルに依



水平軸: 20 msec/div
図5 指数曲線状時間の変化

存して変化するが、本検討では一定値とした。また、応答のフィールド間の相関もないものとしている。

3. ホールド型表示方式の動画質の評価

3.1. 評価方法と条件

評価法はITU-Rの推奨する方法の1つであるEBU法^[6]に基づいて実験を行った。基準画像は静止画、評価画像は基準画像を等速移動させた画像とし、評定者に基準画像に対する評価画像の画質をカテゴリ付きで評価してもらった。評価尺度(カテゴリ)は5段階妨害尺度(1~5)である。

評定者は非専門家15~17名で行った。

主な観視条件は以下の通り

- (1)画面高に対する視距離 20"の全画面高に対して4H
- (2)画面最高輝度 約100cd/m²
- (3)有効画面の大きさ 256mm(横)×104mm(縦)

(走査線密度は525本/全画面とほぼ等しい)

他の条件は標準観視条件をほぼ満足している。

評価に使用した画像は、BTAのハイビジョン標準画像(静止画)から3種類(肌色チャート、観光案内板、ヨットハーバー)を選び、その中の中心部分の432×168画素を切りだして使用した。さらにこれらの画像を一定速度で移動させて動画像を作成した。

3.2. 基礎的な画質の評価

実験1. 異なる絵柄に対するホールド型発光表示の動画質の評価

実験1と実験2はフィールド周波数 f_v が約68Hzとした場合の実験である。ここでは、最近のVDTのフィールド周波数が70Hz前後のものが多いことを考慮して、やや高めのフィールド周波数とした。このため、ホールド型として1/480秒のフィールドを7回繰り返して表示した。パラメータは、絵柄と方式と速度である。方式として8倍速表示とホールド型表示を用いた。動画をフィールド周波数480Hzで正確に表示する方式をここでは8倍速表示方式と呼ぶ(図6)。8倍速表示は実験において劣化のない場合の目安として用いた。8倍速表示方式では V_x (水平方向の速度)=13.6、27.2(deg/sec)で移動する動画像、ホールド型表示方式では V_x =3.9、7.7、11.6、15.4、23.1、30.8(deg/sec)で移動する動画像を

作成し、8倍速走査CRTディスプレイで表示し、評価実験を行った。

実験結果を図7に示す。縦軸上の数字は評価尺度上のカテゴリを表し、横軸の数字は視角速度を表す。図の d_{AB} は、分散分析による有意差の尺度(ヤードスティック)である。

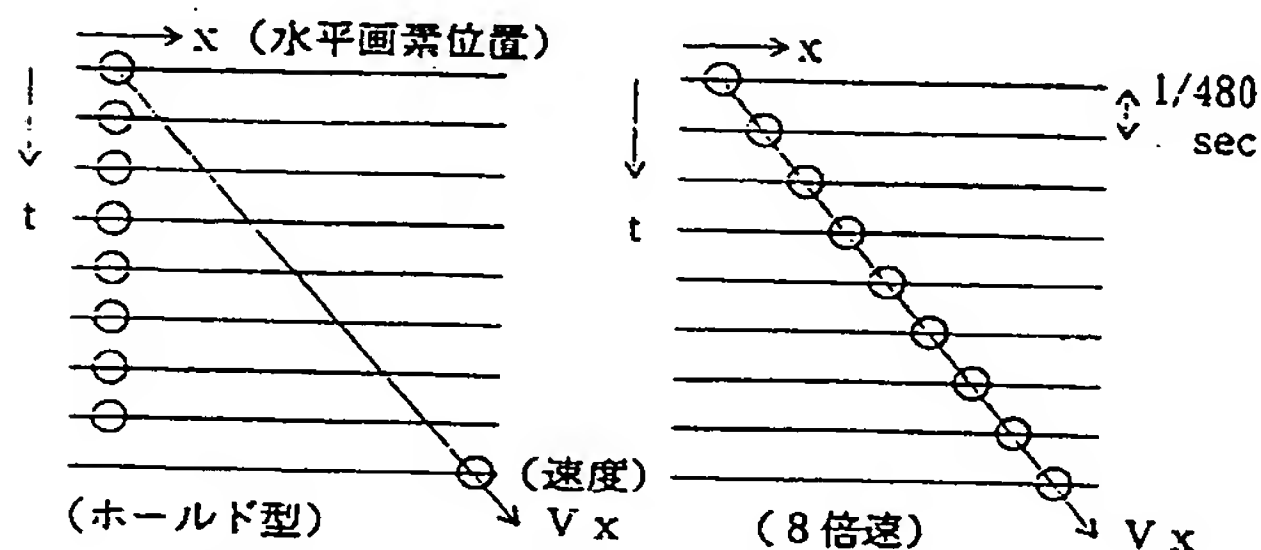


図6 ホールド型表示と8倍速表示

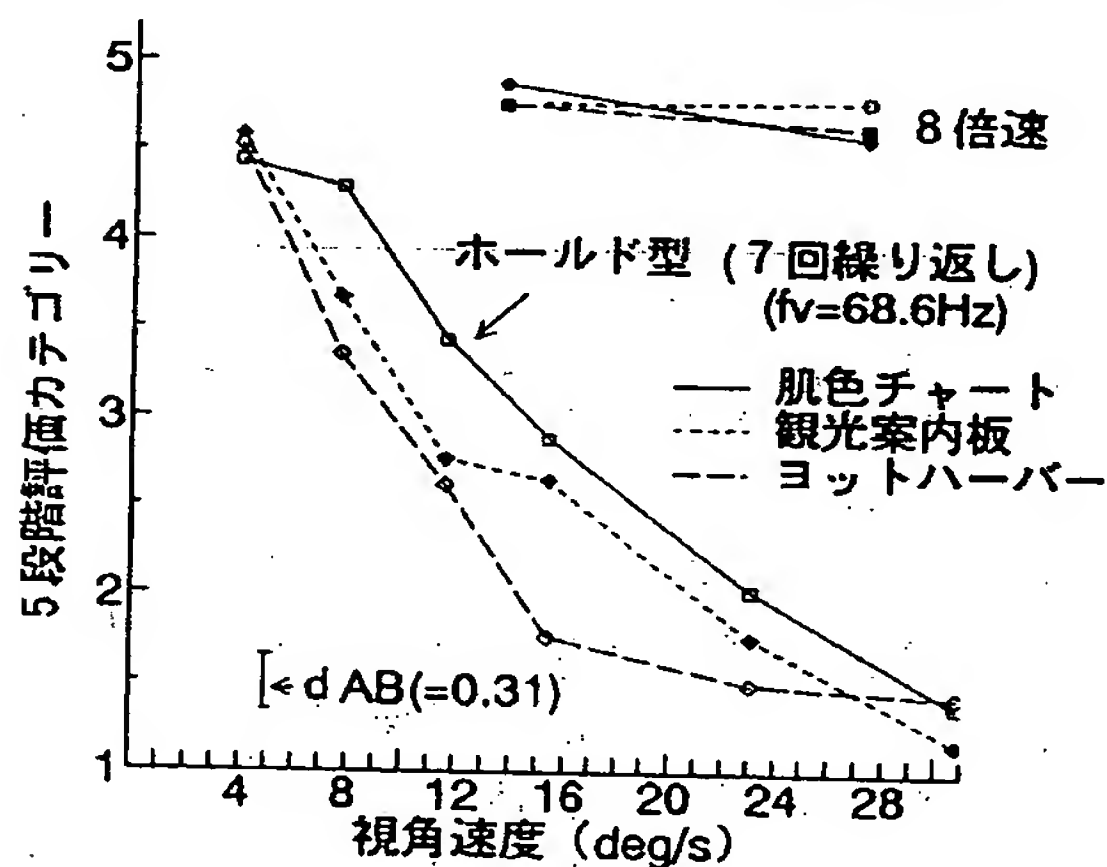


図7 ホールド型表示の動画質の評価

図を見ると、8倍速表示では、絵柄や速度により評価の差はない。評価値はいずれも検知限(4.5)を上回っており、ほとんど画質の劣化は見られない。ホールド型では、速度により評点に有意な差が認められる。絵柄の違いに対しても有意な差が認められる。絵柄の違いにより有意差を生じている原因は、画像の移動方向に垂直なエッジ成分の量に違いがあるためと考えられる。以後の実験2、3、4、5では、もっとも標準的な肌色チャート画像と、画質劣化が3種の中で大きく現れるヨットハーバー画像を用いて評価した。また、テレビ番組における一般的な動き速度は3~6(deg/sec)であり、10(deg/sec)程度もかなり頻繁に生じるとも言われている^[9]。以後、テレビジョンにおいてよく現れる早い動きの速度として、速度13(deg/sec)前後の評価値を1つの目安として検討する。図7より、速度

15.4(deg/sec)では、標準的な肌色チャート画像でも許容限(3.5)から0.5ランク程度下まわっており、評価の厳しい傾向のヨットハーバー画像では2ランクも下まわっている。よってホールド型表示方式では動画像画質がかなり劣化すると言える。なお、筆者らが観察したところでは、劣化要因として、フリッカやジャダーが画像の1部に感じられることもあったが、ほとんどはぼけ妨害が主であった。

実験2. 動き方向の相違による動画像の評価

実験1では、画像の動きは常に一定方向(左から右)への移動であったので、この実験では異なる方向への移動に対する劣化について評価した。絵柄は1種類(肌色チャート)を使用。方式として8倍速表示とホールド型表示(7回繰り返し)を用い、移動方向を右、左、上、下への4種類とした。

紙数の制限によりデータは省略するが、上方向の評価値と他方向の評価値には有意な差があることが認められたが、左右下方向間には有意な差が認められなかった。この結果から、以後の実験3、4、5では評定者の疲労等を考慮して移動方向は左から右、または右から左への移動で実験を行うが、左右の方向の違いは評点においては無視できるものと考えられる。

実験3. 指数型表示とホールド型との比較

本実験では(2)式の時間-発光強度特性を持つ場合の動画像とホールド型表示の動画像の比較を行った。

絵柄は2種類(肌色チャート、ヨットハーバー)を使用。方式として8倍速表示、8回繰り返し(ホールド型($f_v=60\text{Hz}$))、指数型(指数曲線状に変化)を用いた。指数型として、(1)式において時定数 $\tau=5\text{msec}$ 、 10msec の場合を評価した。8倍速表示では $V_x=13.6(\text{deg/sec})$ 、8回繰り返し(ホールド型)と指数型では $V_x=6.8, 10.2, 13.6, 20.4, 27.2(\text{deg/sec})$ で等速移動する動画像を表示し、評価した。実験結果を図8、9に示す。

結果から、速度と方式の違いにより評価値に有意な差があることが認められた。速度 $13.6(\text{deg/msec})$ の評価値を比較するとどちらの絵柄においても、ホールド型表示から、 $\tau=5\text{msec}$ において平均で約0.2ランク、 $\tau=10\text{msec}$ において平均で約0.5ランク下まわっており、ヨットハ

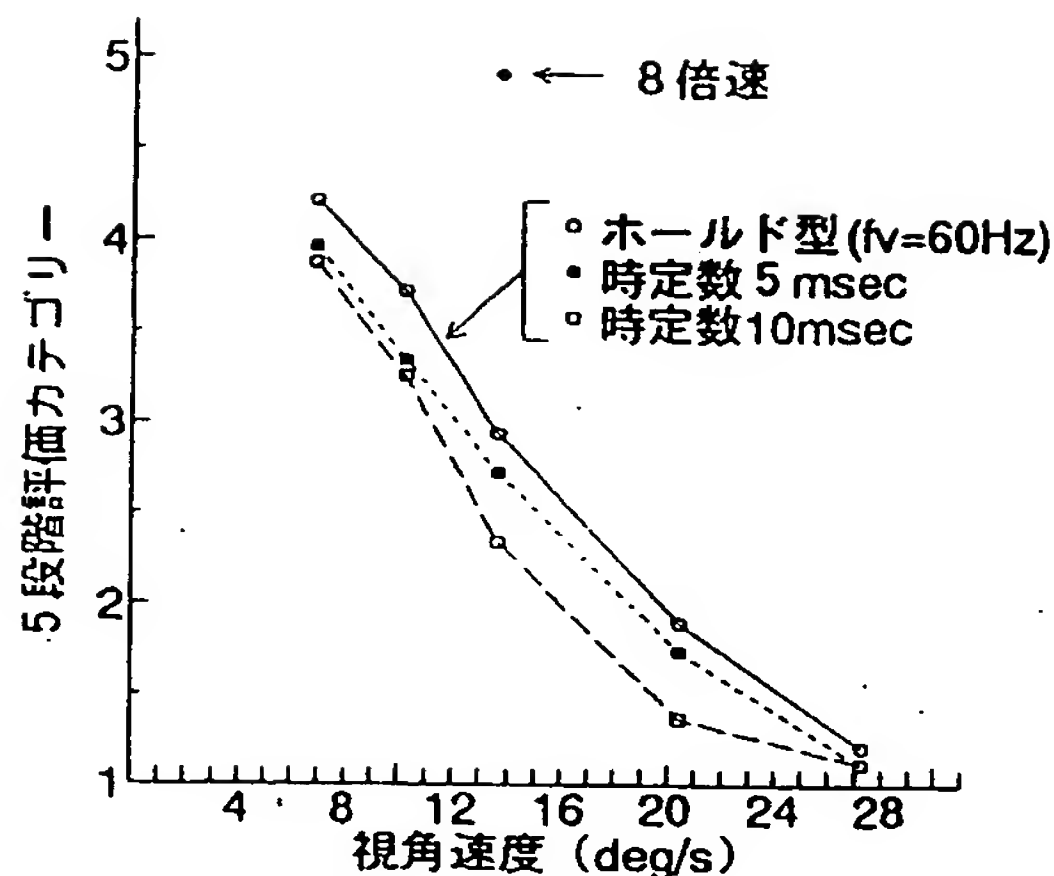


図8 指数型表示の評価(肌色チャート)

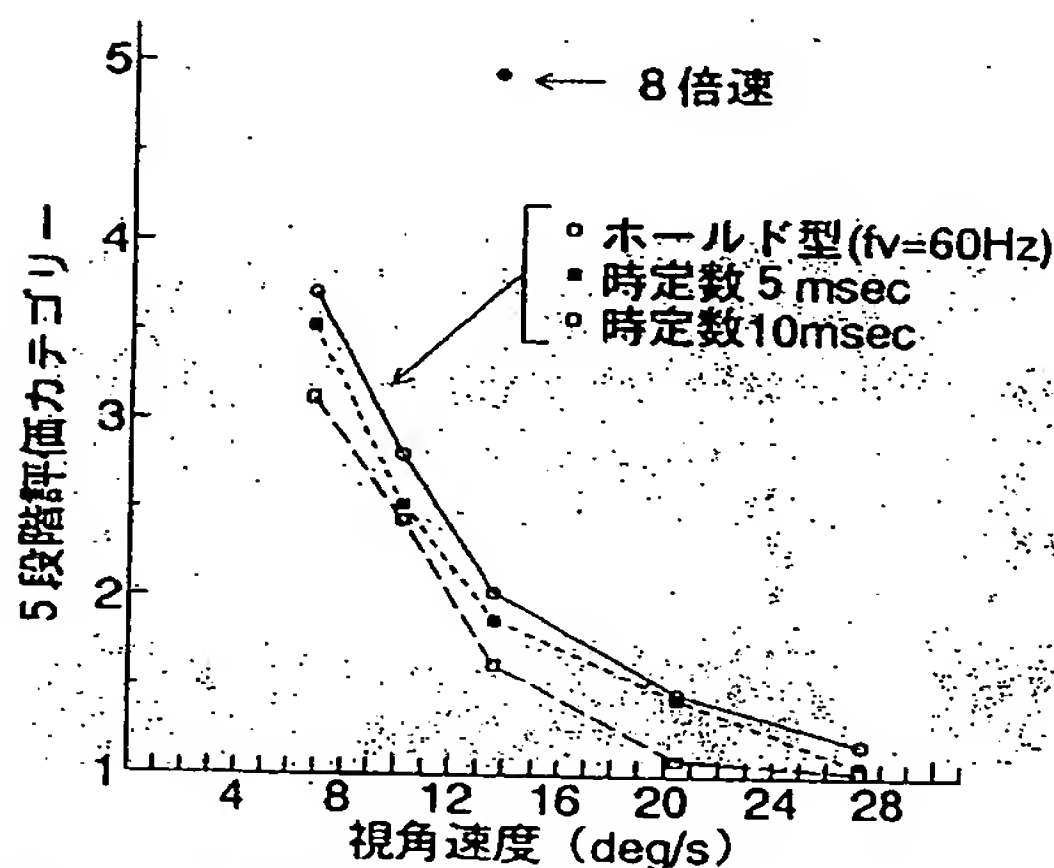


図9 指数型表示の評価(ヨットハーバー)
ーバー画像では、ホールド型表示においてもがまん限(2.5)以下となっている。また、同じ画像の $\tau=10\text{msec}$ の場合は、テレビ番組の一般的な動き速度程度である速度 $6.8(\text{deg/msec})$ のときでも許容限を下まわっている。しかし、 $\tau=0$ に相当するホールド型においても中程度以上の速度ですでに画質が許容限以下となっている。このため、現状のデバイスの応答速度が改善され、ホールド型の発光特性を持つようになっても、その発光表示方式が原因となり動画像の画質が劣化すると考えられる。従って、指数型も含めホールド型の動画像表示においては、何らかの画質改善が必要と考えられる。

4. ホールド型表示方式の動画像の改善方法の検討

4.1. シャッターによる画質改善の検討(実験4)

ホールド型ディスプレイにおける動画像の劣化の改善方式として、ディスプレイシャッターを

設けることを考える。ホールド型では、1フィールド間発光が保たれるため、時間方向のアーチャ（開口）効果によって表示の時間周波数特性が $\sin x/x$ の形で劣化し、そのために動画質の劣化が引き起されと考えられる。よって、その発光にシャッタをつけ、開口時間を制限すればアーチャ効果を減じることができ、動画質の画質劣化の改善が可能と考えられる。このようなシャッタを用いて画質改善を図る方法は、撮像側ではすでに検討され^[10]、また、実用化されている。本実験では、シャッタの開口率を変化させたときの動画質を評価する。

フィールド周波数 f_v は60Hzとし、方式として8倍速表示、シャッタ開口率100%（ホールド型）、75%、50%、25%を用いた。その時間-発光強度を図10a、b、cに示す。なお、本実験において

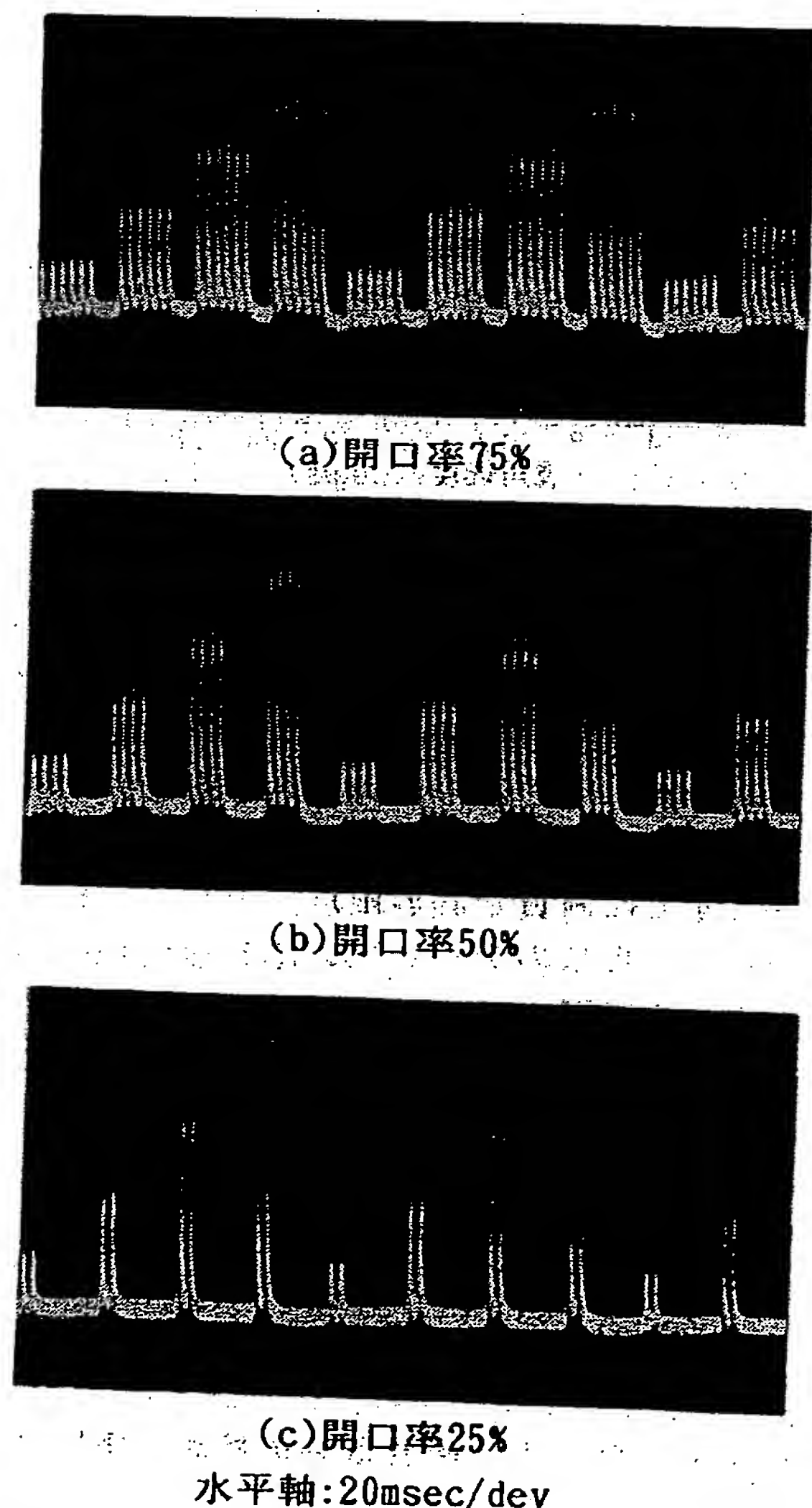


図10 シャッタ方式による時間-発光特性

は基準画像は各々の評価画像と同じ開口率の静止画とし、各基準/評価のペアについては輝度の違いを生じないようにした。さらに、評定者には、画像の輝度の違いは評価に含めないよう教示した。実験結果を図11、12に示す。

図11の肌色チャート画像の結果では、速度13.6(deg/msec)の場合の評価に関し、開口率100%（ホールド型）の値と他の値の比較すると、開口率75%で1ランク程度、開口率50%で1.5ランク程度、開口率25%で2ランク程度改善が認めらる。また、かなり速い速度20.4(deg/msec)でも、開口率50%で許容限を上まわっている。さらに開口率25%では追従視の限界に近い速度27.2(deg/msec)でも許容限を上まわっている。ヨットハーバー画像の速度13.6(deg/msec)において、開口率100%（ホールド型）との比較をおこなうと、開口率75%で0.5ランク程度、開口率50%で1.5ランク程度（許容限近く）、開口率25%で2.5ランク程度改善が認められた。速度6.8(deg/sec)に

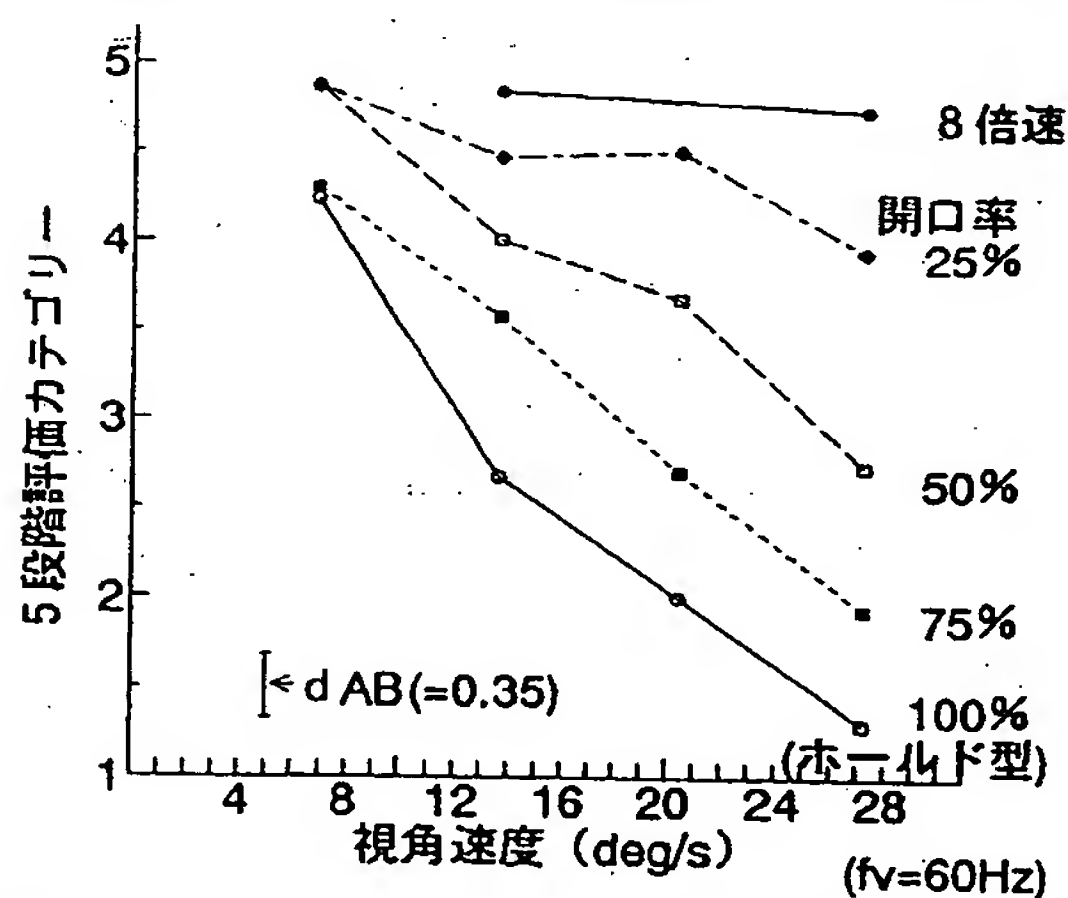


図11 シャッタ方式の評価（肌色チャート）

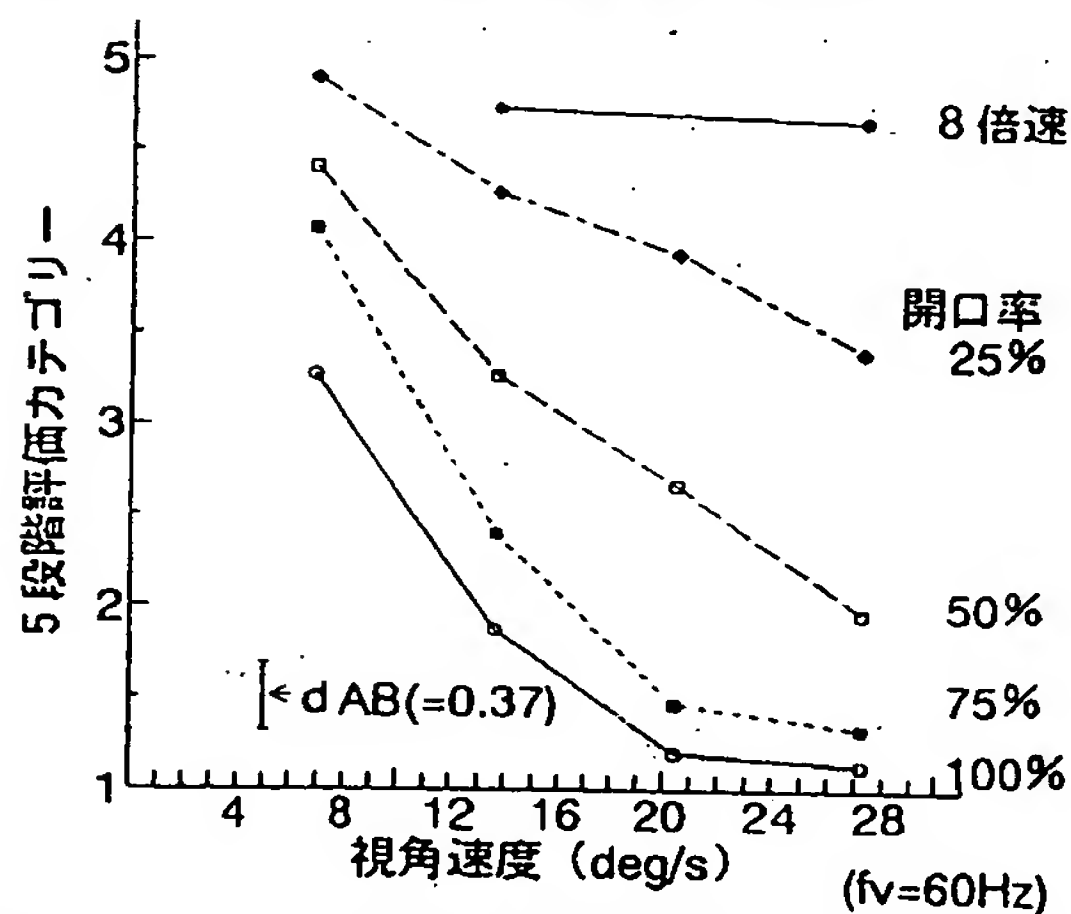


図12 シャッタ方式の評価（ヨットハーバー）

において、肌色チャート画像では開口率25%~50%で0.5ランク程度、ヨットハーバー画像では開口率25%~50%で1~1.5ランク程度の改善が認められた。開口率25%では追従視の限界に近い速度27.2(deg/msec)でも許容限に近い評価値となっている。

撮像側でのシャッタによる画質改善の検討では⁽¹⁰⁾、1/3開口率で一般的な動き速度(3~6(deg/sec))で1ランク程度、やや速い12(deg/sec)で1.5~2ランク程度の改善があると言われており、本実験ではこれとほぼ同様の改善を得た。

評価値が厳しい傾向のヨットハーバー画像において、シャッタ開口率50%(13.6deg/sec)の評価値が許容限程度であるので、開口率を50%以下にすれば、テレビディスプレイとして有用と言えよう。しかし、開口率を減少させていくと、輝度も下がるという問題がある。

4.2. 2倍速表示方式の検討(実験5)

シャッタ方式の輝度の低下に対処するため、ホールド型ディスプレイにおける動画質改善の他の方法として、2倍速表示方式を検討する。2倍速表示方式とは、フィールド周波数60Hzの2倍の120Hzで走査し、表示する方式である(図13)。その時間-発光強度を図14に示す。この方式は、画素の表示周期が半分になり、原理的にシャッタ開口率50%の表示方式と同程度の動画像の画質劣化になると考えられる。本実験では、ホールド型とシャッタ方式(開口率50%)と2倍速表示方式における動画像の画質を評価する。

フィールド周波数は $f_v=60\text{Hz}$ とし、方式として8倍速表示、ホールド型、シャッタ型(開口率50%)、2倍速表示を用いた。評価実験結果を図15に示す。

図15から、シャッタ開口率50%と2倍速表示方式ではほとんど差は見られないが、27.2(deg/sec)では、有意差があり、2倍速表示の方が良い値となっている。実験では、評価値が厳しい傾向のヨットハーバー画像においても、シャッタ方式の開口率50%と同様な評価が得られた。これらの結果から、2倍速表示方式もテレビディスプレイとして有用と考えられる。しかし、2倍速表示方式ではシャッタと異なり画像を受像機側で60Hzから120Hzに内挿する必要がある。このような時間内挿を動画像に対して画質を劣化させずに行うには、動き補償等の高度な画像処理を必要とする。このため、2倍速方式はシャッ

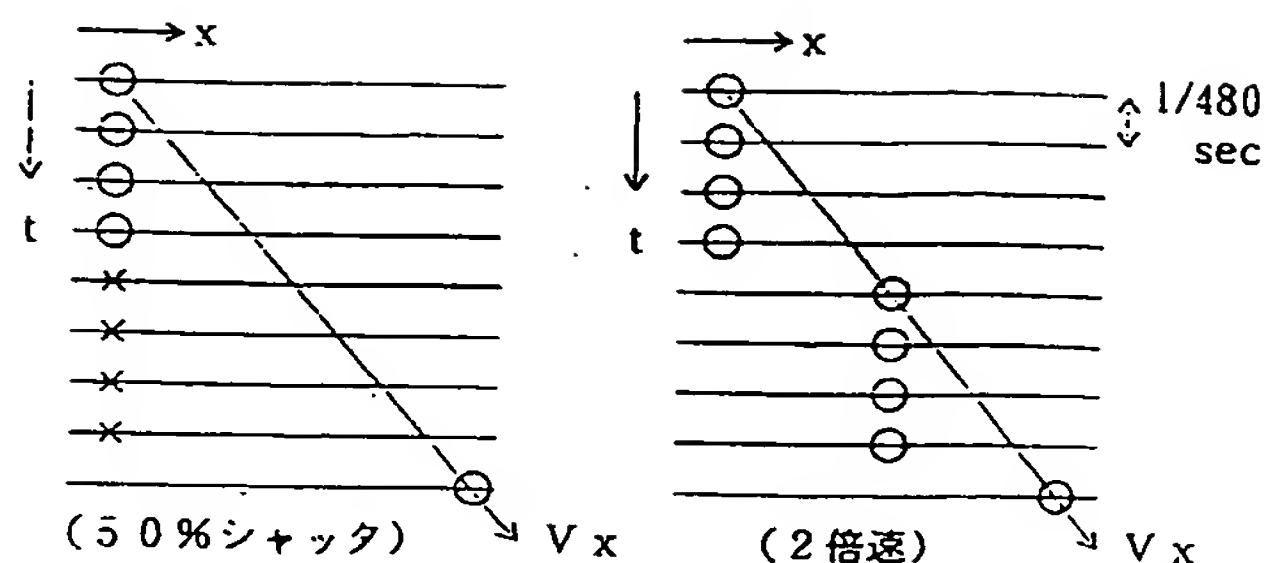


図13 50%シャッタによる表示と2倍速表示

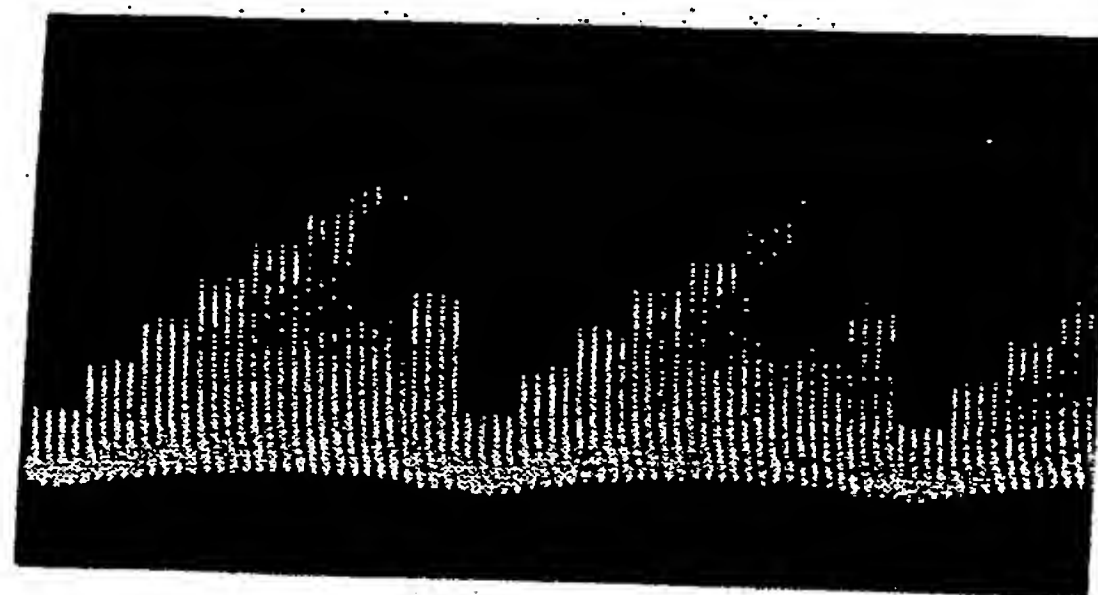


図14 2倍速表示の時間-発光特性

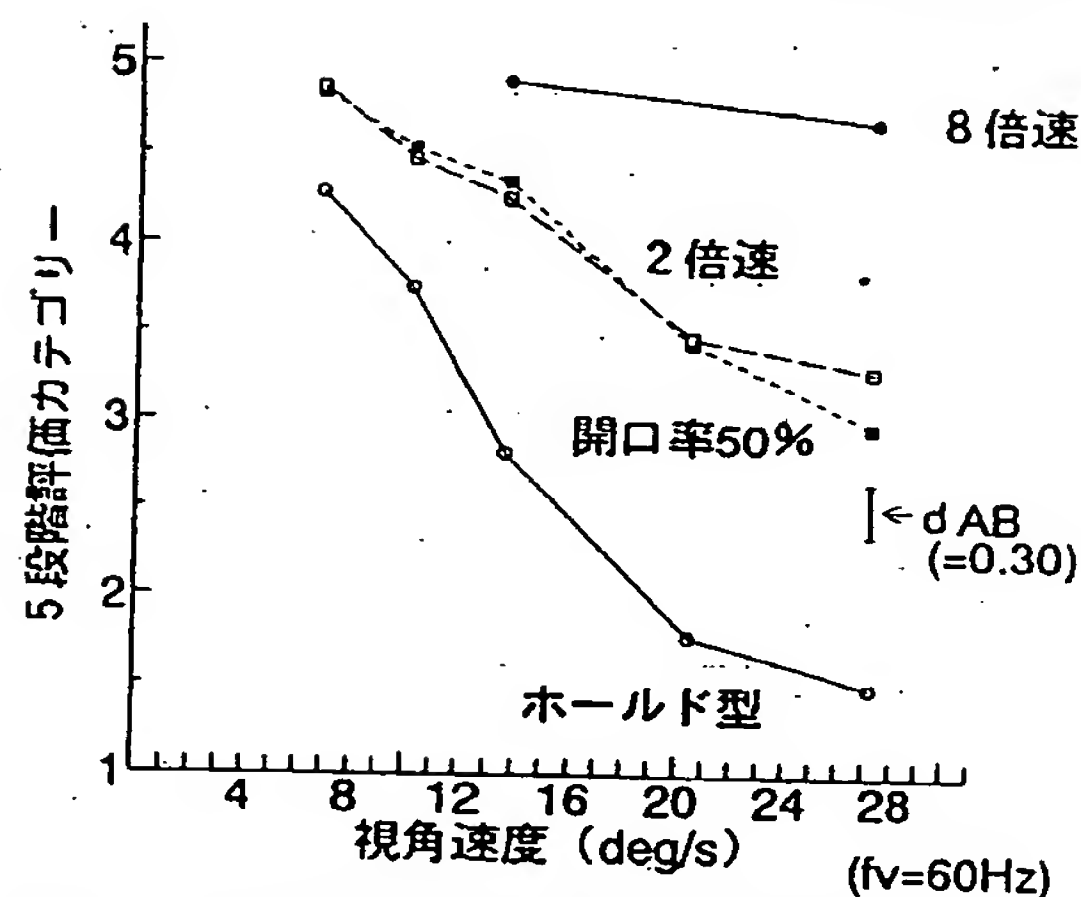


図15 2倍速表示の評価(肌色チャート)

タ方式と異なり輝度は低下しないという長所を有するものの、受像機側の回路の実現がやや困難な点が問題である。

4.3. 実験結果のまとめと考察

評価実験より得られた結果と考察をまとめる。

- (1) ホールド発光型の動画像の画質は速度が増すに従って、大きく劣化する。
- (2) 絵柄によっても評価に有意な差が現れる。
- (3) 移動方向については絵柄が同じ場合、左右下方向については評価に有意な差がない。
- (4) 指数型の応答速度を持つ遅い場合、理想的なホールド型より、評価が低くなる。その程度は速度13.6(deg/sec)において、時定数 $\tau = 5 \text{ msec}$

cで0.2ランク程度、 $\tau = 10\text{msec}$ で0.5ランク程度
ホールド型より下まわる。

(5)ホールド型においても13.6(deg/sec)の速度
で評価が許容限を下まわってしまう。このため、
テレビディスプレイとして用いるには何らかの
画質改善策が必要である。

(6)シャッタ方式では、肌色チャートの速度13.
6(deg/sec)において、ホールド型に対し、開口
率75%で1ランク程度、50%で1.5ランク程度、2
5%で2ランク程度の大きな改善が認められた。

(7)シャッタ方式の開口率50%と2倍速表示はほ
ぼ同等な画質となった。速度20.6(deg/sec)まで
は、両者の評価に有意な差が認められないが、
非常に速い速度(27.2(deg/sec))では、肌色チャ
ート画像において2倍速表示の方が若干良いと
いう有意差が認められた。

5. むすび

本報告では、8倍速CRTを用いたシミュレ
ーション評価実験により、ホールド型の時間一
発光特性を持つディスプレイの動画像表示にお
ける画質(動画質)を定量的に明らかにした。
加えて応答速度の遅い指数型表示の動画像画質
についても明らかにした。これらの表示方式で
は画像の動き速度とともに画質が劣化する。そ
の改善案として、シャッタを用いる方式、2倍
速表示方式を検討した。結果として、受像機側
でシャッタをつけ、その開口率を50%以下にすれ
ば、一定の画質改善効果が得られた。また、2
倍速表示方式では、シャッタ開口率50%と同様の
画質改善が得られた。しかし、シャッタを用い
る方式では、開口率を下げると輝度が低下する
という問題がある。一方、2倍速表示方式では、
輝度は低下しないものの、ディスプレイ側の回
路実現が難しいことが問題となる。これらいず
れかの問題が解決されれば、ホールド型ディス
プレイの動画質をより改善できると考えられる。

しかし、今回深い検討に至らなかった点もあ
る。例えば、現状のLCDデバイスのような応
答速度の遅い場合のシミュレーションとして時
定数一定の特性を用いたが、実際のLCDデバ
イスでは時定数が駆動電圧(透過率=輝度に対
応)に依存する、などの点である。今後、より
実際に近い時間-発光特性によるシミュレーシ
ョンが望まれる。

参考文献

- [1]宮原誠：“低コマ数ディスプレイ方式の動画像画質”，信学論，Vol. J62-B, No. 7 (1979-7)。
- [2]Yasushi NOYORI, Hajime WASHIO, Yoshifumi SHIMODAIRA: "Subjective Evaluation of Quality of Moving Pictures on a TFT-Liquid Cristal Display", IDRC 1994, pp. 329-332.
- [3]下平美文, 平野哲夫, 福家俊郎：“ホールド型画像表示における動きぼけ妨害”，信学論，Vol. J68-B, No. 12(1985-12)。
- [4]下平美文, 小長井祐介：“動画像における Jerkiness 妨害”，信学論，Vol. J70-D, No. 9(1987-9)。
- [5]D. J. Channin, D. E. Carlson: "Rapid turn-off in optical gate liquid crystal devices", Applied Physics Letters, Vol. 28, No. 6, 15, March 1976.
- [6]M. HACK, T. FISKE, R. A. MARTIN, H. STEEMERS: "Analysis of Transient Optical Response of Active Matrix Liquid Crystal Displays", AMLCDコンファレンス, 工学院大学, 1994.
- [7]Lothar Spillmann, John S. Werner: "VISUAL PRECEPTION. THE NEUROPHYSIOLOGICAL FOUNDATIONS", p. 89, Academic Press (1990).
- [8]ITU-R REC. 500-6: "METHODOLOGY FOR THE SUBJECTIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF TELEVISION PICTURES", (1995-10).
- [9]宮原誠, 藤尾孝：“動画像の画質とテレビジョン信号方式”，電子通信学会, 画像工学研究会, IE75-95(1975)。
- [10]宮原誠：“テレビジョンにおける動画像画質-ぼけの減少と毎秒フィールド数の増加による改善-”，信学論，Vol. J60-B, No. 5 (1977-5)。

THIS PAGE BLANK (USPTO)